

基于块匹配的粒子图像测速算法

王 一¹, 盛惠兴^{1,2}

(1 河海大学 计算机与信息学院, 江苏 常州 213022;

2 常州市传感网与环境感知重点实验室, 江苏 常州 213022)

摘 要: 在粒子图像测速(PIV)算法研究现状的基础上, 提出基于块匹配的 PIV 算法. 针对算法中的匹配区划分和匹配准则选择, 给出了匹配区划分的一般准则, 即匹配区尺寸必须显著大于粒子直径; 同时提出了以最小绝对误差/最小均方差匹配准则替代传统的互相关准则的 PIV 算法. 实验证明, 采用最小绝对误差和最小均方差准则替换传统的互相关评价准则, 在保证估计精度基本不变的前提下, 算法的运行时间减少超过 50%, 运行效率提高一倍以上; 实验结果也证明了匹配区划分准则的正确性.

关键词: 粒子图像测速; 块匹配; 互相关; MAD/MSE; 匹配区

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)06-0144-04

Particle Image Velocimetry Algorithm Based on Block Matching

WANG Yi¹, SHENG Hui-xing^{1,2}

(1 College of Computer and Information, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2 Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environmental Sensing, Changzhou 213022, China)

Abstract: Reviews the research status of the Particle image Velocimetry algorithm based on a new block-based matching algorithm of PIV have been proposed. For two key algorithm-to match the zoning and match the criteria for selecting article gives general guidelines to match the zoning, the size of the matching area must be significantly larger than the particle diameter; MAD / MSE matching criteria for alternative traditional inter-related criteria for PIV algorithm. The experiment proved that the use of the MAD and MSE criteria to replace the traditional cross-correlation evaluation criteria to guarantee the estimation accuracy is essentially the same premise, the running time is reduced by more than 50%, operating efficiency more than double; experimental results also clearly proved the correctness of the match the zoning guidelines.

Key words: particle image velocimetry; block matching; cross-correlation; MAD/MSE; match zone

1 引言

由于传统的用于图像测速的图像处理技术过于复杂, 难以高效地获取运动场. 因此, 本文结合图像编码中的高效块匹配技术, 并基于流场测速中的互相关理论加以改进, 研究了基于块匹配的 PIV 算法.

PIV 技术的基本原理: 在流场中撒入跟随性较好的示踪粒子, 用强光源照射流场中的一个测试平

面, 用 CCD 等设备记录下两次曝光时间间隔之间粒子的位置, 然后采用数字图像处理的算法逐点去处理 PIV 底片或 CCD 记录的图像, 获得流场速度分布^[1]. 通过图像分析得到同一粒子在两幅图像即当前图像与参考图像中的不同位置, 求得该粒子的位移; 位移除以时间间隔, 便可得到该粒子的速度, 以粒子的速度代表其所在的流场中相应位置处流体的运动速度.

粒子选取的原则: 粒子的密度应当尽量等于流

收稿日期: 2012-09-10; **修回日期:** 2012-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972101)

体的密度,粒子的半径应当在保证散射光强的前提下尽可能的小.双脉冲激光片光源、透镜和照相机构成了 PIV 的成像系统,通常采用双脉冲激光器作为光源.

图像处理系统用于从两次曝光的粒子图像中提取速度场.速度场的提取是 PIV 算法的关键,在气体、液体等流场测量工程领域中,人们研究了 PIV 算法及其速度场提取^[2];为精确获得流场速度,文献[3]中针对传统的 FFT 算法加以改进,提出了一种改进的基于 FFT 的 PIV 互相关算法.这些速度场提取算法,需针对整幅图像进行 FFT 变换,当成像分辨率提高和图像精度提升时,存在计算量大,算法效率低的问题.为此,本文参考视频编码中的块匹配算法,提出了基于块匹配的 PIV 算法,在保证速度场估计的准确性的基础上,显著减小了计算开销.

2 基于块匹配的 PIV 算法

在基于块匹配的 PIV 算法中,将粒子图像按照行列分成若干个匹配区.假定同一匹配区内的粒子有相同的移动速度,并且在相邻两幅图像中作直线运动.通过块匹配按照特定的匹配准则寻找到该匹配区的位移,从而得到匹配区内的粒子的移动速度,进而得到速度场分布.因此,基于块匹配的 PIV 算法中的两个关键点就是匹配区的划分和匹配准则的选取.

匹配准则的选择:将图像按照某种方式进行区域离散并得到匹配区后,需要制定一个匹配准则,即如何判定在参考帧图像中的候选匹配区即为当前帧图像中的待匹配区,这种匹配的方法称为匹配准则.传统的粒子图像匹配的准则采用互相关算法,就是从相邻的两幅图像中通过互相关函数判别规则得到最相似的匹配区.采用互相关函数(cross correlation function, CC)匹配的 PIV 算法就是互相关算法.设当前帧图像中的待匹配区为 $f(k, l)$,参考帧图像中的候选匹配区为 $g(m, n)$,则其互相关函数可以定义为

$$CC(m, n) = \frac{\sum \sum f(k, l) g(k+m, l+n)}{\sqrt{\sum \sum f^2(k, l) \sum \sum g^2(k+m, l+n)}} \quad (1)$$

式中, (m, n) 为位移矢量,若在某一个位移 (m_0, n_0) 处 CC 达到最大,则该位移所对应的匹配区为要找的最优匹配区.

常用图像匹配准则中,除了互相关函数外,还有

最小绝对误差 MAD 和最小均方差 MSE 两种准则,二者的数学描述参见式(2)和(3).

$$MAD(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |f_c(m, n) - f_r(m+i, n+j)| \quad (2)$$

$$MSE(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (f_c(m, n) - f_r(m+i, n+j))^2 \quad (3)$$

式(2)和(3)中, (i, j) 为位移矢量, f_c 和 f_r 分别为当前帧图像中的待匹配区和参考帧图像中的候选匹配区,匹配区的大小为 $M \times N$. 若在某一个位移 (i_0, j_0) 处 MAD/MSE 达到最小,则该位移所对应的匹配区为要找的最优匹配区.

匹配区的划分:基于块匹配的 PIV 算法中的另一个关键点就是匹配区的划分.由于假定同一匹配区内的粒子有相同的移动速度,因此匹配区的尺寸必须设置合理,既不能太小也不能太大.匹配区的尺寸必须明显大于示踪粒子,从而保证一个匹配区中包含多个示踪粒子,否则会导致较多误匹配的出现.匹配区的尺寸同时也不能太大,也就是说匹配区中所包含的示踪粒子数量不能过多,否则容易导致假设条件的不满足,即由于粒子数太多,从而不能保证均具有相同的速度.

基于块匹配的 PIV 算法的流程如图 1 所示.当前图像和参考图像分别就是第 i 幅图像和第 $i+1$ 幅图像,匹配区矩阵 $F(M, N)$ 当前图像被无缝分割成的 $32 \times 32, 16 \times 16$ 或 8×8 个匹配区,对应的匹配区尺寸分别是 $8 \times 8, 16 \times 16$ 或 32×32 .

根据匹配区位移矢量 $D_{i,j}(x, y)$ 获得匹配区移动速度 $V_{i,j}$ 的方法如式(4)所示.

$$V_{i,j} = \sqrt{D_{i,j}^2(x) + D_{i,j}^2(y)} \quad (4)$$

在本文中,粒子/匹配区移动速度均采用两幅图像间的粒子位移来替代.在计算整幅图像的平均粒子位移时,算法仅采用了 $1 < i < M$ 且 $1 < j < N$ 的匹配区 $F(i, j)$ 所对应的 $V_{i,j}$,因处于图像边缘的匹配区可能会由于移出图像区域而导致被误匹配.基于块匹配的 PIV 算法采用 C 语言加以实现,我们使用开源的计算机视觉库 OpenCV. 主要使用 OpenCV 库函数用于图像的读取、显示和运动场的绘制. OpenCV 构建了一个简单易用的计算机视觉和图像处理框架,能便捷地设计复杂的计算机图像处理相关应用程序.算法对算法运行时间和流场速度估计均进行了累计和计算,用 OpenCV 绘制流场分布图.

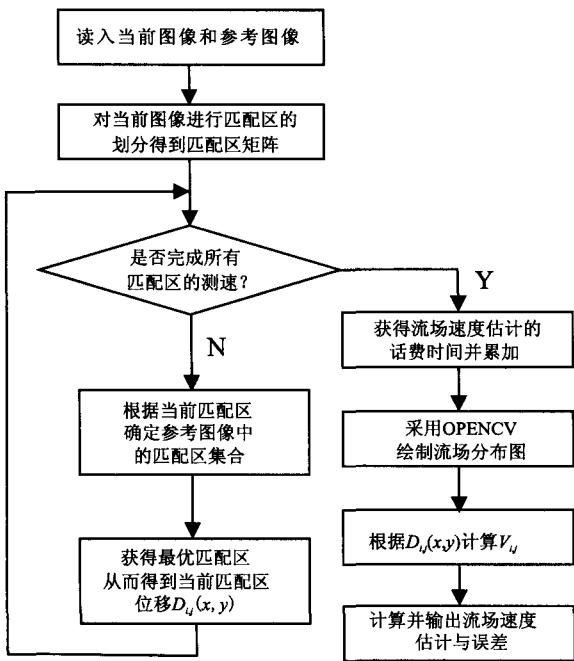


图 1 基于块匹配的 PIV 算法流程

表 1 采用不同匹配准则和匹配区尺寸的测试结果

Block Size	dv_CC/%	dv_MAD/%	dv_MSE/%	dt_MAD/%	dt_MSE/%
32×32	1.03	1.34	1.35	52.4	58.23
16×16	15.73	5.77	5.1	58.46	59.31
8×8	100.52	35.94	39.55	63.76	62.26

纵向比较可以发现随着匹配区尺寸的减小,速度估计的误差显著增加.当采用 32×32 的匹配区时,误差能保证在 1% 左右,估计结果比较精确;而当采用 16×16 的匹配区时,误差增加到 5% 以上;当采用 8×8 的匹配区时,误差高达 35% 以上,算法已经无效.针对三种匹配准则的横向比较可发现通过采用 MAD 和 MSE 准则替换传统的互相关评价准则,在保证估计精度基本不变的前提下,显著减小算法运行时间.以 32×32 的匹配区划分为例,三者的估计精度均在 1% 左右的误差,但采用 MAD 和 MSE 的算法其运行时间均比采用互相关准则的算法减少超过 50%,即运行效率提高一倍以上.为进一步验证上面的论述结果,我们同时绘制出了每个测试序列的流场分布图,并选择其中一个为例,如图 2 所示.图 2(a)和(b)分别是用于速度估计的当前图像和参考图像,图 2(c)、(d)和(e)分别是采用 32×32 、 16×16 和 8×8 匹配区划分时所得到的流场分布图.由图中可见,虽然 32×32 矢量图较为稀疏,但其流场分布更规则和流畅; 16×16 矢量图虽较稠密,但其中隐藏了较多的矢量噪声; 8×8 的矢量图

3 实验结果和分析

为验证基于块匹配的 PIV 算法的有效性,采用 Okamoto 在 2000 年给出的用于 PIV 算法测试的标准数据集^[4-5]进行了实验和测试.标准测试序列的图像均为 256×256 解析度,平均的粒子尺寸为直径 5.0 像素.

实验实现了 32×32 、 16×16 和 8×8 三种匹配区划分,互相关匹配准则 CC、最小绝对误差匹配 MAD 准则和最小均方误差匹配 MSE 准则三种匹配准则共 9 组实验,每组实验均对 8 个标准序列进行了测试.表 1 中结果是所有标准序列相应测试结果的均值.对算法运行时间和结果误差进行了比较. dv_{CC} 、 dv_{MAD} 和 dv_{MSE} 分别是采用三种匹配准则时的速度估计的误差; dt_{MAD} 和 dt_{MSE} 分别是采用 MAD 准则和 MSE 准则时,算法运行时间相对于互相关准则所节约的运行时间.

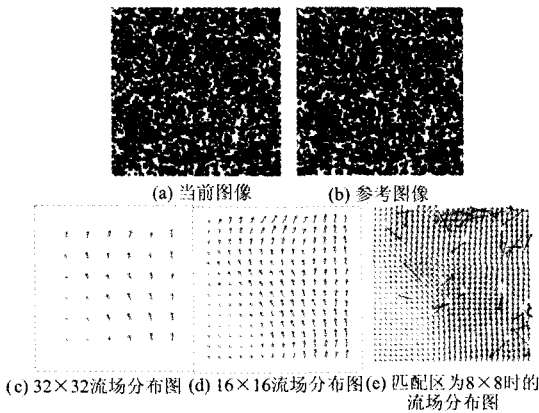


图 2 不同尺寸匹配区所对应的流场分布图

最稠密,但其中出现了很多明显的误匹配和速度估计错误.原因是采用 8×8 匹配区划分时,其分块大小已经很接近于粒子的尺寸,从而导致估计错误的出现.

4 结束语

提出了基于块匹配的 PIV 算法,并针对算法中的两个关键——匹配区划分和匹配准则选择分别进

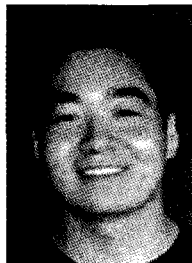
行了论述. 文章给出了匹配区划分的一般准则,即匹配区尺寸必须显著大于粒子直径;同时提出了以MAD/MSE匹配准则替代传统的互相关准则的PIV算法. 实验证明,采用MAD和MSE准则替换传统的互相关评价准则,在保证估计精度基本不变的前提下,算法的运行时间减少超过50%,即运行效率提高一倍以上;实验结果也证明了匹配区划分准则的正确性.

参考文献:

- [1] Elsinga GE, Adrian RJ, Van Oudheusden BW, et al. Three-dimensional vortex organization in a high reynolds number supersonic turbulent boundary layer[J]. J Fluid Mech, 2010(644):35 - 60.
- [2] 谢龙,靳思宇,于建国,等. 阀体后 90°圆形弯管内部流场 PIV 分析[J]. 上海交通大学学报, 2011(9):1395-1399.
- [3] 鲍晓利,李木国. 一种改进的基于 FFT 的 PIV 互相关算法[J]. 大连理工大学学报, 2011(3):417-421.
- [4] Okamoto K, Nishio S, Saga T, et al. Standard images for particle-image velocimetry[J]. Meas Sci Technol, 2000(11):685-691.

- [5] Okamoto K, Nishio S, Kobayashi T, et al. Evaluation of the 3D-PIV standard images (PIV-STD Project) [J]. Visualization, 2000(3-2):115-124.

作者简介:



王 一 男,(1986—),硕士研究生. 研究方向为数字图像处理.



盛惠兴 男,(1961—),副教授. 研究方向为数字图像处理.

(上接第 143 页)

误差扰动情况下,宽带恒定束宽波束形成器具有出较好的稳健性. 本文中的设计方法对于研究宽带恒定波束形成具有一定的启示作用.

参考文献:

- [1] 鄢社锋,马远良. 传感器阵列波束优化设计及应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 幸高翔,蔡志明. 基于二阶锥约束的方向不变恒定束宽波束形成[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9):2109-2112.
- [3] 陈阳,张艺朦,赵安邦,等. 基于二阶锥规划的自适应

均衡算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 904-907.

- [4] Sturm J F, Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones[J]. Optimum Methods Software, 1999(2):625-653.

作者简介:

宋志宏 男,(1977—),硕士研究生,工程师. 研究方向为水声信号与信息处理.

肖 瑜 男,(1964—)教授. 研究方向作战仿真与虚拟现实.